



## Gestion du problème de changement climatique

Aida Nefzi Bouzidi

### ► To cite this version:

Aida Nefzi Bouzidi. Gestion du problème de changement climatique. cinquième colloque international sur le Thème: "Energie, Changements Climatiques et Développement Durable", Jun 2009, Hammamet, Tunisie. hal-00476277

**HAL Id: hal-00476277**

**<https://hal.science/hal-00476277>**

Submitted on 25 Apr 2010

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## **Gestion du problème de changement climatique**

*Aida NEFZI*

*E\_mail : aida.nefzi@yahoo.fr*

## Abstract

“Climate change is characterized by large uncertainties. Therefore, we formulate the main question of our paper: how to account for uncertainties in the decision to prevent climate change? The economics of environment and natural resources would help us to establish an economic thinking, able to reflect the many dimensions of the problem.”

## Résumé

« De la science du changement climatique aux estimations de ses impacts, le problème du changement climatique se caractérise surtout par la présence de grandes incertitudes. C'est pourquoi nous formulerons la question principale de notre article: *comment tenir compte des incertitudes dans la décision de prévenir le changement climatique* ? L'économie de l'environnement et des ressources naturelles nous aiderait à dessiner la portée du problème de gestion du problème du changement climatique et nous permettrait de dresser une réflexion économique, capable de rendre compte des nombreuses dimensions du problème, tout en préservant la lisibilité des résultats. »

**Mots-clés :** changement climatique, incertitudes, irréversibilité, valeur d'options, actualisation

## Introduction

En principe, la gestion effective d'écosystèmes implique les mêmes principes économiques que la gestion effective de tout autre capital. Dans la pratique, cependant, les écosystèmes possèdent plusieurs traits qui rendent une gestion efficace particulièrement problématique.

L'exemple le plus illustratif est celui du système climatique qui est un système adaptatif hautement non linéaire et complexe, possédant des interconnexions étendues inters composantes. De nos jours ce système est le centre d'intérêt des politiques et communautés internationales à cause du changement potentiel qu'il subit. Les experts du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC, ou IPCC en anglais) [1] s'accordent sur le fait qu'un changement climatique se produira se traduisant principalement en un réchauffement moyen de 1.5 à 5.8°C degrés en 2100.

Ce changement est le résultat de l'accroissement de la concentration de certains gaz dans le réservoir atmosphérique contribuant à l'intensification de l'effet de serre. Le terme effet de serre est utilisé pour annoncer le rôle de serre réalisé par les gaz

atmosphériques. Ceux-ci sont quasi transparents aux rayonnements solaires mais absorbent l'infrarouge et les irradient à nouveau vers la terre, contribuant à maintenir une température favorable à la surface de la terre. La plupart de ces gaz nommés aussi gaz à effet de serre sont identifiés. Leur rôle dans la régulation du climat ne suscite pas de controverses. Cependant, plusieurs incertitudes subsistent. Nous identifions principalement deux niveaux : des incertitudes au niveau de l'identification des modifications du régime climatique et d'autres au niveau des impacts de ces modifications sur les écosystèmes et systèmes humains. En fait, la réponse du climat à l'accroissement de la concentration de ces gaz est complexe. Elle dépend de l'interaction de cette augmentation avec les phénomènes présents à l'intérieur du réservoir atmosphérique, ainsi que tous les autres systèmes naturels et humains en interférence qui présentent de potentielles trajectoires de dépendance en évolution continue.

Face aux incertitudes exogènes et endogènes, tel que les non linéarités et les aspects imprévisibles, l'identification de l'ampleur des implications quantitatives et qualitatives du phénomène est difficile. La question économique qui se pose face à ce dilemme est, si cette imprécision justifie des décisions de prévention et de lutte contre le changement climatique. La réponse à cette question dépend de l'appréciation des risques du changement climatique par les différents acteurs impliqués dans ces décisions ainsi que de leur reconnaissance de la vulnérabilité de nos sociétés face aux risques induits par le changement climatique.

Depuis la prise de conscience d'un éventuel changement du climat, la reconnaissance du problème a évolué avec la progression de la recherche scientifique. La position des experts a passé d'un stade de prudence à celui de la conviction. La comparaison faite dans le rapport du GIEC (2007) entre les estimations suggérées par leur premier rapport du GIEC en 1990 (augmentation de la température de 0.15 à 0.3°C par décennie) et les valeurs observées durant la période de 1990 à 2005 (augmentation de la température de 0.2°C) a renforcé la confiance des projections de court terme. De même l'amélioration des modèles numériques mis au point par la communauté scientifique afin d'établir les estimations détaillées de l'ensemble des réponses possibles du système climatique, permet maintenant d'obtenir de meilleures estimations et d'évaluer les marges d'incertitude susceptibles d'être donnés pour les projections de réchauffement. De son côté, la communauté internationale sous l'égide des Nations Unies (Rio, 1992) a reconnu officiellement le problème et a posé les bases d'une action internationale coordonnée contre l'effet de serre à travers la Convention Climat. L'objectif de cette convention est « (...) de stabiliser (...) les

*concentrations des Gaz à Effet de Serre (GES) dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique* » (CCNUCC, 1992, article 2). L'un des principes fondamentaux instauré par la convention est le principe de précaution qui affirme qu'il ne faudra pas attendre qu'il y'ait une certitude scientifique pour agir contre le changement climatique, parce que le jour où on obtiendra cette certitude, il serait certainement trop tard. Cette convention est aujourd'hui ratifiée par cent quatre vingt dix pays, alors qu'au début seul cinquante pays l'ont adopté. En plus de cet objectif d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre, les nations déploient leurs efforts afin de mettre en place une gestion adaptative et des principes préventifs pour faire face aux éventuelles perturbations climatiques et ses conséquences défavorables possibles.

Avec cette évolution de la reconnaissance du problème et la multitude des projets proposés, l'action se trouve confrontée aux conflits des différents acteurs impliqués (les pouvoirs publics, les citoyens, les industriels et les experts) dans la décision. En fait, ce type de projets implique des investissements énormes. Choisir un projet donné, nécessiterait d'évaluer les coûts et bénéfices de tels projets. Bien que les évaluations des coûts puissent ne pas susciter de controverses, celles des bénéfices qui sont liées aux conditions du futur lointain devraient l'être. D'un côté, les coûts peuvent être définis en termes de coûts d'opportunité [2] (associés à la restriction des activités industrielles ou commerciales, par exemple) ; alors que les bénéfices sont définis relativement à leurs effets sur les améliorations du bien-être des individus, ils proviennent de plusieurs contributions dures à évaluer et à cerner mais très importantes. D'un autre côté, les coûts seraient supportés pendant longtemps par les membres de différentes générations alors que les bénéfices seront acquis dans le futur lointain. Ainsi, les controverses autour de la nécessité d'agir sont justifiées. La décision d'investir dans de tels projets suscite donc une intervention puissante du décideur public au nom de l'intérêt général.

Les quelques considérations que nous avons évoquées précédemment, cernent le champ d'analyse du problème de gestion du changement climatique. Il s'agit de prendre une décision publique dans un univers incertain dont les conséquences sont non seulement liées à cette décision mais aussi à l'évolution du phénomène. L'incertitude sur le phénomène se résorbe dans le temps et avec l'arrivée de nouvelles informations. Le coût de la décision prise sera pressenti par la génération présente mais les bénéfices seront réalisés dans le futur lointain. Ces débats sont suffisamment complexes qu'il serait difficile de les embrasser tous. Pour se saisir du problème, nous

allons adopter une approche prudente qui évoquera les aspects du problème d'une manière simple et progressive.

Dans la suite, nous explicitons ces éléments tout en les situant dans le cadre du problème de changement climatique et nous instaurons les hypothèses nécessaires à l'instauration d'un modèle simplifié sur la gestion du problème du problème de changement climatique dans un univers incertain.

## Les éléments de décision dans un univers incertain

Dans un univers incertain, considérons un décideur public rationnel. Celui-ci précisera, en fonction de son analyse, les éléments suivants de son problème de décision :

1. un ensemble supposé compact et convexe d'actions réalisables ;  $(1, \dots, x, \dots, X) \subseteq \mathfrak{R}$  (ensemble des réels),
2. un ensemble des états de la nature indiquant les états possibles de l'environnement, constitué d'un nombre fini d'éléments ;  $(1, \dots, s, \dots, S)$ ,
3. une fonction de conséquences  $c(x, s)$  indiquant les résultats de toutes les combinaisons d'actes et d'états de la nature,
4. les probabilités de réalisation de l'état de la nature :

$$\pi_s \text{ tel que } \pi_s \in [0,1] \text{ et } \sum_{s=1}^S \pi_s = 1$$

5. une fonction d'utilité  $u(c)$  représentant les préférences d'un individu représentatif

## Les actions : concepts d'irréversibilité et de valeur d'option

Dans la gestion des problèmes de l'environnement tel que le changement climatique, le concept d'irréversibilité peut être centrale. L'effet d'irréversibilité ou de perte de flexibilité présente un caractère dual :

- D'abord, la décision de ne pas agir peut causer des dommages causés, à l'environnement, souvent irréversibles. Un aspect symptomatique de l'environnement est qu'une fois changé, il ne peut pas être restauré facilement à ses conditions courantes, au moins sur une échelle de temps pertinente. La conservation d'une forêt ou d'une rivière constitue, une option réversible, ce qui n'est pas le cas pour la construction d'une autoroute ou d'un barrage. L'émission de gaz à effet de serre réduit considérablement la flexibilité des générations futures. En effet, l'effet des activités anthropiques est durable: elles augmentent à jamais (ou presque) la teneur des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, une partie de ces gaz accumulés (comprise entre 13 et 17% selon le GIEC) serait irrémédiable et il serait

difficile et même impossible pour les générations futures d'envisager de récupérer un jour le gaz émis par des méthodes artificielles. Cette caractéristique de l'irréversibilité nous incite à agir vite afin d'éviter les risques ou au moins les réduire, ceci est tout à fait compatible avec le principe de précaution instauré par la communauté internationale.

- Ensuite, la décision d'agir, puisque les investissements dans les projets de prévention génèrent des dépenses souvent irrécupérables. La réduction des émissions de gaz à effet de serre, par exemple, nécessite d'investir dans de nouvelles technologies. Ces investissements sont, pour leur part, irrécupérables. Ceci pose des problèmes s'ils s'avéreraient inutiles ex-post: l'arrivée de nouvelle information peut, par exemple, nous révéler que le dommage par unité de polluant est en fait dérisoire et qu'on aura gaspillé des sources inutilement. Cela constitue une incitation à reporter la charge, donc à ne pas investir dans l'action de prévention. Cet aspect de l'irréversibilité va dans le sens inverse que l'attitude de précaution. On assiste plutôt à une attitude de type attendre l'information puis agir (*Learn then act ; en anglais*) qui consiste à résoudre l'incertitude avant d'engager des dépenses dans la prévention.

Les deux aspects de l'irréversibilité révèlent que ce phénomène est étroitement lié aux incertitudes associées aux problèmes de l'environnement. D'un côté, l'incertitude sur l'ampleur des dommages et de l'autre côté celle qui porte sur les bénéfices futurs de la prévention. C'est principalement dans le contexte de l'incertitude sur les bénéfices futurs associés à l'existence du bien environnementale que fut exploré l'effet de l'irréversibilité. Arrow et Fisher (1974) ont proposé une définition simple et littérale des irréversibilités: « *était irréversible ; la décision de défigurer un site naturel en vue d'un projet industriel sans la possibilité de marche arrière* ». Ils établirent que la perspective d'acquérir de l'information incite à privilégier les décisions irréversibles.

Ceci conduit au concept de la valeur d'option : « *Conserver un atout environnementale unique dans son état présent nous autorise à changer nos avis plus tard. Le changer irréversiblement ne l'autorise pas* ». (Heal et al, 1992)

Conserver un bien environnemental doit donc être exécuté avec une « valeur d'option » parce qu'il laisse ouvert l'option de reconsidérer la décision: le changement climatique est éventuellement, un phénomène irréversible.

### ***Valeur d'option, quasi valeur d'option et valeur espérée de l'information***

*La valeur d'option comme mesure d'aversion pour le risque*<sup>1</sup> : Le premier à introduire la notion de

valeur d'option dans la littérature économique est Burton Weisbrod (1954), il démontre qu'une incertitude sur la demande ou l'offre d'un bien ou service public implique éventuellement l'existence de bénéfices (valeur d'option) pour l'individu, en plus du surplus compensateur. Charles J. Cicchetti et A. Myrick Freeman III montre que la valeur d'option de Weisbrod est positive pour les individus averse au risque et que les bénéfices supplémentaires provenant de ce type de bien sont équivalents à une prime de risque. Aussi, il est nécessaire de procéder à des ajustements des bénéfices et coûts espérés pour les individus. Une définition proposée par le GIEC explique au mieux la signification de valeur d'option telle qu'elle est proposée par Weisbrod : « *La valeur d'option est basée sur ce que les individus sont prêt à payer aujourd'hui pour la possibilité de préserver ces biens pour un usage futur (personnel) direct ou indirect.* »

*Le quasi valeur d'option ou valeur d'option séquentielle comme mesure de l'information* : Dans les travaux du début des années 1970 [Arrow et Fisher (1974) ; Henry (1974)] on montre que : même s'il est inapproprié de postuler une aversion au risque dans l'évaluation d'une activité<sup>2</sup>, les décisions d'investissements irréversibles produisent un « sentiment » qui va dans le même sens que l'aversion au risque ; plus il y a d'incertitude quant aux effets futurs, plus la prudence est de mise. Par exemple, lorsque l'humanité fait disparaître une espèce végétale quelconque, elle se prive de la possibilité de recherches futures sur celle-ci ; ceci peut être décrit comme la perte d'une valeur d'option ou plus précisément de valeur de quasi-option. Le terme valeur de quasi-option est souvent substitué par celui de valeur d'option vu son ambiguïté. Il est cependant, nécessaire de rappeler la distinction entre ces deux notions, la littérature a examiné deux situations assurant l'existence d'une valeur d'option (positive) : l'aversion pour le risque et l'effet d'irréversibilité, ce dernier est le contexte de la valeur de quasi-option. L'interprétation de la notion de quasi-option par le GIEC donne : *Dans un contexte d'incertitude, la valeur de quasi-option est considérée comme définissant la valeur de sauvegarder les options pour un usage futur dans*

---

and irreversibility », Quarterly Journal Of Economics, 88, May 1974, 312-319.

<sup>2</sup> Dans une analyse des bénéfices d'investissements publics, et partant de la question : même en assumant une attitude non neutre face au risque est-t-il nécessaire que l'on exécute pour la société les ajustements entre bénéfices et coûts espérés que l'on fait pour les individus comme a montré Cicchetti et Freeman ? Arrow et Lind (1970) montrent que, puisque les recettes nettes d'un investissement de dimension donnée sont partagées par un grand nombre d'individus, le total de toutes les primes de risque individuelles tend vers zéro. Seuls Les bénéfices espérés, devraient alors, être considérés dans l'évaluation de l'investissement.

---

<sup>1</sup>Ce paragraphe s'inspire de l'article de Kenneth Arrow et Anthony Fisher ; « Environmental Preservation, Uncertainty,

*l'espoir que les connaissances, sur les bénéfices ou sur les coûts attachés à l'option, progresseraient dans le temps.* Traditionnellement, la formalisation du concept de valeur d'option s'est réalisée dans le contexte de l'investissement dans un projet de conservation dont les bénéfices sont incertains à présent mais qui seront révélés dans le futur. Nous nous proposons dans la suite d'examiner cette structure.

La formalisation du concept de valeur option d'un bien environnementale ou écologique est fondée autour de la proposition suivante :

Proposition 1. Les bénéfices d'un projet de conservation d'une ressource sont incertains à présent mais seront révélés dans le futur. Si la ressource est conservée, la décision au sujet de la conservation peut être reconsidérée, à la lumière de meilleurs renseignements robustes au sujet des avantages de son existence. Si par contre, la ressource n'est pas conservée, il n'y a aucune chance de révision lorsque nous disposerons d'informations vigoureuses sur son existence. Dans ce cas les règles de décision conventionnelles sous estimeront la valeur de conserver la ressource.

La formalisation de cette proposition peut contribuer à illuminer la prise de décision par le planificateur. Celle-ci peut se faire par l'emploi de plusieurs outils, le plus employé d'entre eux est le calcul économique. Plusieurs façons de faire du calcul économique coexistent, elles dépendent du critère de décision choisit. Ces approches sont comparables en ce qu'elles permettent de formaliser et d'analyser des problèmes de décision séquentielle tout en respectant certaines dimensions.

## **Les conséquences**

Comme nous l'avons précisé précédemment, les conséquences sont à la fois liées aux actions et aux états de la nature. Les états de nature sont gouvernés par l'ampleur du changement climatique. Ramener les conséquences à des sommes monétaires est une hypothèse simplificatrice souvent imposée dans le cas du problème de décision en univers incertain.

Posséder une évaluation monétaire de ces impacts peut s'avérer particulièrement utile pour savoir si les coûts de prévenir le changement du climat étaient justifiés ou non par les bénéfices.

Bien que beaucoup de progrès dans les techniques d'évaluation soit réalisé, les résultats obtenus sont approximatifs. Au-delà des incertitudes qui cernent les estimations il existe un nombre important de points de désaccord à plusieurs axes de recherche :

- Sur la méthode d'évaluation des dommages.
- Sur la méthode d'évaluation des coûts de réduction.

## **Controverses**

Les incidences éventuelles de l'évolution du climat sur le bien être des individus sont nombreuses. Bien

qu'une large gamme d'outils et de méthodes ait été développée, les scientifiques restent à ce jour sceptique quant à leur quantification. En effet, *« ces effets ne se produisent pas dans un cadre fixé et à l'équilibre mais dans une société qui change constamment »*. (Minh Ha-Duong, 1998)

Ainsi le GIEC reconnaît que *« (...) Dans les systèmes humains intensément gérés, les effets directs du changement du climat peuvent être tellement amortis ou complètement confondu avec d'autres facteurs qu'il serait impossible de les détecter »*. Partant de l'évidence : *« (...) les effets du changement du climat sont très transparents dans les systèmes où les manipulations humaines sont éphémères »*. Les experts du GIEC suggèrent que : *« les Systèmes qui contiennent un excellent « processus de base » cohérent des effets du climat et des événements du temps, et où l'intervention humaine est minime, peuvent servir comme indicateurs des effets plus généraux du changement du climat dans les systèmes et les secteurs où ils sont aisément étudiés »*. (IPCC, 2001)

Le choix de tels indicateurs est compliqué. Les approches existantes relatives aux estimations des éventuels dommages ont tendance à se concentrer sur les conséquences les plus fermement établies du réchauffement tel que, les conséquences des températures extrêmes sur la santé, la productivité agricole et la qualité et disponibilités en eau. Dans ce cadre, Nordhaus (1993) souligne que la moyenne globale de température, statistique sur laquelle s'est basée la plupart de ces approches, a peu d'intérêt économique. Il affirme qu'on ne peut pas analyser l'impact des divers taux de réchauffement sur l'agriculture, par exemple, sans savoir quelques choses sur les changements régionaux dans les précipitations et l'humidité du sol. Il suggère, par conséquent, d'utiliser *« plutôt, des variables qui accompagnent ou sont le résultat du changement de la température - précipitation, niveaux de l'eau, extrêmes sécheresses ou gels, (...) »* ceux-ci conduiront, selon lui, aux impacts socio-économiques.

Si le choix d'indicateurs est déjà le centre de discussion lorsqu'il s'agit de quantifier les effets généraux du changement climatique. Attribuer certains événements météorologiques au changement climatique constitue un autre point de controverse. *« Il peut même ouvrir le champ à des prises de positions radicales et opposées quant à la décision d'agir pour prévenir le changement climatique. Ainsi Yves Lenoir, par exemple souligne « les avantages désormais tangibles de l'enrichissement en gaz » et qui rappelle que les gens préfèrent plutôt avoir chaud que froid »*. (Minh Ha-Duong, 1998). De telles positions peuvent influencer la perception des conséquences du changement climatique et intervenir par la suite quand il s'agit de décider d'agir.

Il découle de ce paragraphe qu'il reste difficile de quantifier les effets du changement climatique sur les sociétés et les écosystèmes. Ce qui fait que le traitement des conséquences soit marqué par l'incertitude.

Là encore, identiquement au travail qui concerne les incertitudes sur la science du climat, les experts du GIEC, ont traité les incertitudes et estimé les biais dans les jugements. Bien que des progrès aient été réalisés dans le développement de méthodes pour définir des niveaux de confiance des estimations, des résultats et des conclusions, ils reconnaissent que plus de travail est exigé.

### ***Evaluation monétaire de dommages liés au changement climatique : revue de la littérature***

Les évaluations des dommages sont nombreuses et variées dans la littérature. La mesure de l'impact économique du changement climatique, généralement utilisé, est égale au montant par lequel le climat d'une période donnée affectera la production ou le PIB de cette même période. Les composantes spécifiques incluses dans ces études sont, essentiellement, l'augmentation du niveau la mer, les changements de température liés à la demande de chauffage et de climatisation, les conséquences des températures extrêmes sur la santé, les changements estimés dans la productivité agricole ainsi que la qualité et les disponibilités en eau. Les différents chercheurs ne couvrent pas les mêmes données sur ces éléments et ce malgré un outre passément considérable. (J. Decanio, 1997) Pour évaluer les dommages on commence par séparer les dommages marchands – faisant références aux impacts sur les activités ou les secteurs produisant des biens et des services marchands, des dommages non marchands c'est-à-dire ; les impacts sur l'environnement, la biodiversité et la santé...

**Biens Marchands** Dans le cas des biens marchands, une évaluation monétaire se fait généralement, sur la base des prix du marché ajustés (pour corriger les distorsions du marché) grâce à des méthodes simples. Une approche traditionnelle d'estimation d'impact, couramment utilisée, s'appuie sur une fonction de production empirique pour prédire les dégâts économiques. Cette approche adopte une fonction de production spécifique et évalue les impacts en faisant varier une ou plusieurs variables telles que la température, les précipitations et les niveaux de dioxyde de carbone. Cependant, cette méthode suscite beaucoup de discussion – notamment, quand il s'agit d'évaluer les impacts du changement climatique sur l'agriculture. Une étude élaborée par Mendelsohn et al (1994) : « The Impact of Global Warming on agriculture : A Ricardian Analysis » pour les Etats Unis montre que : « *Bien qu'elle fournit une référence utile pour estimer l'impact du changement climatique sur l'agriculture, les études adoptant l'approche traditionnelle ont un*

*biais inhérent et auront tendance à surestimer le dégât* ».

– En effet, on indique que le biais résulte de l'omission de plusieurs formes d'adaptation que les agriculteurs ratifient en réponse à des changements dans les conditions économiques et environnementales. « *En suspendant une gamme complète d'ajustements, les études antérieures ont surestimé les dégâts du changement de l'environnement* ».

**Biens Non Marchands** Evaluer des biens non marchands dans une métrique commune, en général monétaire est très difficile à faire. Une très vaste littérature consacrée à la question<sup>3</sup> révèle des procédures qui s'appuient sur les dispositions à payer des individus pour un bien ou service environnemental. Cette approche peut conduire à des biais dès lors qu'elle revient à affirmer qu'un dommage n'a pas le même prix selon qu'on est riche ou pauvre. En effet, la disposition à payer de l'individu dépend du revenu de l'agent considéré. L'évaluation des dommages non marchands soulève, en particulier le problème de l'évaluation des effets directs sur le bien-être de l'individu. En effet, il y a certainement une interaction entre le climat et le bien être de l'individu : Maddison et Bigano (2000), par exemple, montrent que les plus hautes températures de l'été réduisent le bien-être des italiens.

Une évaluation monétaire de l'impact du changement climatique sur le bien être de l'individu serait particulièrement utile pour savoir si les coûts de prévenir le changement climatique étaient justifiés par les bénéfices.

**Effet Total** L'agrégation de plusieurs dégâts dans une évaluation unique, appropriée capable de fournir des renseignements au sujet de la magnitude des dégâts prévus sur une échelle globale forme pourrait s'avérer particulièrement intéressante pour les responsables politiques (IPCC, 2002). Dans la plupart des études, les effets sont estimés et valorisés secteur par secteur et groupés pour former ensuite une estimation de tous les changements dans le bien être social ce qui est connu comme l'approche « *Enumerative* »<sup>4</sup>.

Les études présentées par le second rapport du GIEC et ses sous actuels références (Cline 1992, Frankhauser 1995, Nordhaus 1991, Tol 1999a ...) prévoient que les dommages potentiels seront compris entre 1.5% et 2.5% du PIB mondial pour un doublement de la concentration atmosphérique. Bien qu'elles servent de référence, ces chiffres sont contestables. En effet, la fourchette de 1.5% à 2.5%

<sup>3</sup> Une synthèse des principales méthodes d'évaluation des biens environnementaux dans le travail élaboré par Mohan Munasinghe et Ernst Lutz (1995)

<sup>4</sup> Le terme est énoncé par Cline (1994) et repris par Tol et Frankhauser (2002).

du PIB n'inclut pas les risques de surprises climatiques et de non-linéarité dans les adaptations des sociétés au changement climatique.

Finalement, l'ensemble des tentatives d'estimation faite selon l'approche « *Enumerative* » reconnaissent que les pays en voie de développement seront les principales victimes du changement climatique car leurs économies sont plus fragiles et plus dépendantes des milieux naturels, tandis que certains pays froids pourraient globalement en bénéficier du fait de l'augmentation de leurs rendements agricoles par exemple. Un courant de recherches récemment développées montre que ces résultats sont inconsistants. Ces recherches sont fondées sur la base des faiblesses de la méthode « *enumerative* ». Dans ce cadre Frankhauser et Tol (2002), par exemple, critiquent à travers leur travail « *on climate change and economic growth* » le fait que cette méthode ignore les « *interactions dynamiques* » : *« Les études Enumerative s'intéressent à une période unique du temps et cherchent comment le climat observé dans cette période affecte le bien-être social dans cette période particulière dans le temps. Ainsi, ils ignorent les effets inter temporels, et négligent de fournir des renseignements sur la manière avec laquelle le changement du climat peut affecter la production dans le plus long terme »*. Ce papier attire l'attention sur certains effets dynamiques à travers lesquels le changement climatique peut affecter la croissance économique et par conséquent la production future. Les auteurs explorent, en particulier, la direction des deux variables; épargne et accumulation du capital suite au changement climatique en partant d'un modèle d'évaluation intégrée<sup>5</sup> élaboré par Nordhaus (1994). Ils distinguent les deux effets dynamiques suivants :

- Avec un taux d'épargne constant, une production inférieure dû au changement du climat mènera à une réduction proportionnelle dans l'investissement lequel à son tour diminuera la production future (effet d'accumulation du capital).

- Si le taux d'épargne est flexible, les agents précoces peuvent changer leur comportement d'épargne pour s'accommoder aux futurs impacts du changement climatique. Cela changera aussi les perspectives de croissance<sup>6</sup> (effet d'épargne).

L'ensemble des simulations faites dans ce papier suggère que :

- L'effet d'accumulation du capital et l'effet d'épargne sont, tous les deux négatifs, c'est à dire,

face aux changements climatiques les ménages augmentent plutôt la consommation courante que l'épargne pour compenser les futurs dégâts ce qui affectera le taux de croissance économique.

- Les effets indirects sont relativement plus grand pour les plus petits effets directs; les effets indirects sont ainsi relativement plus grands pour les mécanismes de croissance les plus fréquents dans les pays les plus riches.

Ainsi, les études Enumerative sous-estiment les impacts du changement climatique surtout dans le cas des pays riches.

### ***Les Coûts Des actions de Réduction***

*Conception* Réduire les émissions de gaz à effet de serre forme une réponse à cette évidence, cependant cet objectif impose une réorganisation de la société, des conditions de production industrielles et des modes de vie.

La littérature spécialisée nomme coût de réduction les coûts associés à ces transformations.

Afin de préciser les concepts, il est important de noter que les coûts peuvent désigner au moins quatre réalités différentes :

- Coûts Techniques Directs ; se sont les coûts associés à l'emplacement de techniques permettant de réduire les émissions. Ces coûts sont présentés en valeur présente actualisée.

- Coûts Sectoriels ; qui se réfèrent aux coûts de déplacement de l'équilibre partiel entre offre et demande par secteur. L'évaluation de ces coûts se fait en comparant plusieurs scénarios décrivant de manière cohérente l'équilibre partiel du secteur concerné.

- Coûts Macro-économiques ; il s'agit des coûts qui mesurent l'impact des politiques climatiques sur l'économie. Ils sont calculés par rapport au produit intérieur brut en utilisant des modèles d'équilibre général.

- Coûts En Bien Etre ; mesurent les coûts associés aux politiques climatiques qui ne sont pas pris en compte dans les coûts macro-économique. En effet, le PIB ne permet pas de mesurer tous les effets de ces politiques sur la société puisqu'il ne prend en compte ni l'épuisement ni la dégradation de l'environnement. Ceci étant, ces coûts sont déduits à partir de la variation du surplus des consommateurs à la suite de la variation des prix relatifs de l'énergie et des niveaux de revenu induits.

*Evaluation Des Coûts* L'évaluation des coûts de réduction est difficile. Elle nécessite de considérer des hypothèses au sujet de l'évolution du monde sur une très longue période de temps avec et sans un programme de contrôle (les déterminants les plus importants de l'évolution du monde sont : les taux de croissance économique et le progrès technologique à long terme). Ces hypothèses sont des indicateurs importants de la dimension et du

<sup>5</sup> "Évaluation intégrée" veut dire que nous associons des connaissances provenant d'un grand nombre de disciplines pour donner des éclairages qu'il ne serait pas possible d'obtenir par la recherche disciplinaire traditionnelle (IPCC 1995).

<sup>6</sup> D'un côté, les taux des économies peuvent croître parce que les agents souhaitent dédommager le déficit dans le revenu futur. De l'autre côté, le changement du climat pourrait réduire la productivité du capital et, face à un taux de rendement du capital inférieur, les agents préféreraient, éventuellement, consommer plus aujourd'hui. (Tol et al, 2002).



signe des effets du PIB. Cependant, certains facteurs, comme la réponse de la demande d'énergie aux changements dans la production économique ou dans le prix de l'énergie, sont le résultat de la modélisation du comportement d'acteurs économiques en réponse au stimulus exogène. Or, l'incertitude est considérable au sujet des facteurs exogènes et du meilleur chemin de modéliser les comportements. La nature globale du problème du changement du climat ajoute une autre complication à l'analyse des coûts. En effet, le coût de réduction des concentrations globales du carbone dépend des émissions collectives de tous les pays du monde sur la longue période. Dans ce contexte, la méthodologie permettant d'apprécier les coûts non directement observables devient un élément critique dans l'analyse. Les économistes emploient deux méthodes distinctes pour estimer ces coûts. Celles-ci sont caractérisées par l'approche « top-down » et l'approche « bottom-up ».

- La première méthode implique de créer un modèle d'équilibre général fondé sur des grandeurs macroéconomiques, le modèle est conduit sous la base des scénarios dans lequel aucune mesure n'est prise pour contrôler les émissions.

- La deuxième, part de données techniques microéconomiques pour évaluer les coûts par agrégation. Les études « bottom-up » se sont, particulièrement, concentrées sur le niveau d'efficacité d'énergie qui pourrait être accompli si les barrières aux investissements rentables dans l'énergie efficace avaient été éliminées. Contrairement à la méthode « top-down », la méthode « bottom-up » admet la possibilité que certains économies d'énergie (et par la suite réduction de gaz à effet de serre) pourraient être accomplies sans causer la perte à l'économie.

### **Controverses**

Les ensembles les plus fiables d'évaluations montrent que le niveau de vie de la présente population ne serait pas défavorisée (et peut être amélioré) par les politiques de réduction. Les évaluations basées sur des modèles économiques ont tendance à montrer seulement des réductions légères dans le produit intérieur brut (PIB) suite aux réductions des émissions de gaz à effet de serre; les évaluations alternatives basées sur des études techniques de la capacité des investissements rentables dans les énergies efficaces ont tendance à montrer des augmentations modestes du PIB. Les experts du GIEC identifient trois aspects qui justifient ces effets bénéfiques : les potentiels sans regret, le double dividende économique et les autres bénéfices écologiques.

1. Double dividende : les instruments économiques mobilisés dans une politique climatique (tel que taxes ou permis d'émissions procurent des revenus

au gouvernement. Ces revenus réduisent les coûts économiques de réduction des émissions.

2. Potentiels sans regrets : sont définies comme les options (une technologie, par exemple) dont les avantages tel que les coûts réduits d'énergie et les émissions réduites des polluants locaux ou régionaux égalent ou dépassent leurs coûts de la société, à l'exclusion des avantages du changement du climat évité.

3. Les autres bénéfices écologiques, (ancillary benefits ; en anglais) sont les effets subordonnés, ou latéraux des politiques exclusivement consacrées à l'atténuation du changement du climat. Les telles politiques ont un impact non seulement sur les émissions de gaz à effet de serre, mais aussi sur l'efficacité de l'usage de la ressource, comme la réduction des émissions locales et régionales de polluants dans l'air associées à l'usage de combustible fossile, et sur des questions tel que transport, agriculture, etc. Quelquefois ces avantages font référence aux « ancillary impacts » pour refléter le cas où les bénéfices peuvent être négatifs.

Les politiques de réduction des émissions amélioreraient la performance économique, sans même compter les avantages économiques de l'atténuation du changement climatique. Le dessin et la mise en œuvre de mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre diffèrent en termes de coût et efficacité. Il est possible que les politiques basés sur le marché (market-based ; en anglais) comprenant l'approvisionnement pour une coopération internationale fassent le meilleur travail de (a) de réduction efficace et globale des émissions de gaz à effet de serre, et (b) avec une interruption minimale des autres activités économiques (Stephen J. Decanio, 1997)

### **Les probabilités de réalisation**

Nous supposons que l'ampleur du changement climatique qui détermine l'état de l'environnement est gouvernée par une distribution de probabilité. En théorie, certains économistes ont tendances à distinguer entre probabilités objectives et probabilités subjectives. Cette distinction est à la base de la distinction entre risque et incertitude, qui remonte à l'économiste américain Frank Knight. Celui-ci l'a proposé dans son ouvrage « Risk, Uncertainty and Profit » (1921). Selon Knight, dans une situation de risque les probabilités objectives de réalisation des résultats associés aux états de la nature, sont parfaitement connues ; ces valeurs peuvent être obtenues par l'observation répétée du phénomène considéré. Dans une situation d'incertitude aucune classification objective n'est possible et même si les scientifiques disposaient d'un grand nombre d'observations du phénomène, ils seraient incapables d'assigner des probabilités objectives aux différents résultats. Pour déterminer

une distribution de probabilité des états de la nature le décideur recourrait à son estimation subjective de la vraisemblance de chaque résultat. Cette distinction fut rejetée par plusieurs autres économistes en se référant à la démonstration de Savage (1954) sur les probabilités subjectives. Ceux-ci affirment que la distinction de Knight entre risque et incertitude devient stérile dès que nous nous plaçons du côté du décideur. En effet, il montre qu'assigner une probabilité même dans les exemples de lancer de pièce de monnaie ou de dé, de tirage de carte ou de roulette devient une possibilité illusoire, pour lui il ne s'agit pas de l'existence possible d'une classification objective mais plutôt de degré de confiance en ces probabilités.

Prenons l'exemple d'un lancement d'une pièce de monnaie, où assigner une probabilité objective paraît possible, une telle apparence paraît illusoire. La probabilité d'avoir face est égale à  $\frac{1}{2}$  seulement si la pièce utilisée est non truquée. La décision de jouer dépendrait du degré de confiance en loyauté de la personne qui lancera cette pièce. Cependant, personne ne pourrait être objectivement sûre de cette condition. Ainsi, le décideur affecte une distribution de probabilité subjective aux événements quelles que soient les circonstances. Nous pouvons donc conclure que le décideur est toujours dans une situation d'incertitude au sens de Knight.

Une reformulation de l'idée de Knight faite par Treich établit que: « la différence entre risque pur et incertitude provient (...) de l'attente potentielle d'information qui permet la mise à jour progressive de la loi de probabilité subjective du risque », (Treich, 1997). En fait, si nous revenons à l'exemple de la pièce de monnaie, au fur et à mesure des expériences faites sur la pièce de monnaie, le degré de confiance en la probabilité égale à  $\frac{1}{2}$  d'apparition de face évoluera.

Ceci est d'autant plus vérifié dans le cas du changement climatique où les doutes scientifiques règnent sur les prédictions ; à cause du manque d'information et des approximations plus ou moins précises de la réalité. Le troisième rapport d'évaluation du GIEC (2001), a pour la première fois fait une tentative explicite de donner une indication du degré de confiance lié à ses diverses prédictions ; tel que illustré par le tableau suivant.

Tableau 1. Classification des niveaux de confiance par le GIEC.

$\geq 95\%$	Niveau de confiance très élevé
67% - 95%	Niveau de confiance élevé
33% - 67%	Niveau de confiance moyen
5% - 33%	Bas niveau de confiance
$\leq 5\%$	Très bas niveau de confiance

Source ; TRE, 2001

En ce qui nous concerne, pour traiter le cas du problème du changement climatique, l'on admet la théorie de Savage, qui stipule qu'en cas de doutes scientifiques suscitant une ambiguïté quant à la loi de probabilité, les agents économiques prennent leur décision sur la base d'une loi de probabilité subjective. Nous considérons que risque et incertitude sont synonymes. Le problème est collectif, mais comme nous l'avons déjà explicité, c'est décideur public qui prendra la décision dans au nom de l'intérêt général. Dans les procédures courantes de décisions publiques il est courant que le décideur utilise les évaluations de probabilités faites par les experts. On suppose que la distribution de probabilité subjective qu'il utilisera sera celle proposée par le GIEC.

## Cadre économique du problème de gestion du changement climatique :

### Critères de décision

#### L'utilité de Von Neumann et Morgenstern

Il est aujourd'hui incontestable, que le modèle de décision de l'espérance de l'utilité de Von Neumann et Morgenstern (VNM) sert de référence dans tous les domaines de l'économie. L'utilité espérée fut la première théorie classique qui intègre tous les éléments de décision dans un univers incertain afin de permettre à l'individu de décider de l'action la plus avantageuse. Le modèle de VNM prend en compte comme objet d'analyse et de décision les distributions de probabilité sur un ensemble possible de résultats. Pour établir ce critère de décision VNM proposent à priori trois axiomes. Le premier est l'aptitude du décideur à donner un ordre de préférence, complet et transitif, à toutes les conséquences possibles des actions retenues. Le deuxième est celui d'indépendance: les deux actes n'ont pas les mêmes conséquences. Le troisième est celui de continuité: l'ordre des préférences est continu, cet axiome assure que des perturbations suffisamment petites des distributions de probabilité ne modifient pas leur classement. Dans ces conditions, le décideur doit pouvoir associer à chaque conséquence une utilité  $u(c)$ , et à chaque action une utilité espérée :

$$U(x) = \sum_{i=1}^S \pi_i u(c_i)$$

Le choix entre deux décisions se ramène à la comparaison des utilités espérées de celles-ci. La sélection se fera, classiquement, en faveur de l'utilité espérée la plus grande possible.

### **La Contribution De Savage**

Dans le cadre de la maximisation de la fonction d'utilité, la théorie de VNM modélise, comme on vient de le voir, les perspectives incertaines sous la forme de distributions de probabilité sur un ensemble donné de conséquences. Les probabilités sont donc données de manière exogène : ces probabilités sont objectives. Par analogie à la distinction faite par Knight entre risque et incertitude, Von Neumann et Morgenstern considèrent la situation où l'individu conduit ses choix en univers risqué. Cependant, dans notre cas de problème nous avons supposés que risque et incertitude sont synonymes et le décideur conduit sur la base de probabilités subjectives. Par ailleurs, le décideur ne connaît pas les probabilités d'occurrence des différents états de la nature possibles et son choix dépend de son évaluation subjective de ces probabilités.

Il existe plusieurs critères de décision en univers incertain dans la littérature qui reposent essentiellement sur la théorie statistique de la décision. Cependant ces approches ont très vite montré des limites – surtout lorsqu'on cherche à les appliquer de manière systématique à des choix collectifs. (Voir annexe 1)

Nous nous intéresserons à la formalisation de la situation d'incertitude établie par Savage (1954). On se situe dans le même cadre de référence que celui de la maximisation de l'espérance d'utilité. De manière analogue au cas de la décision sous risque, il existe un ensemble de *conséquences*  $C$  et un ensemble d'*états de la nature*  $S$ .

On suppose que les états de  $S$  sont :

- *Mutuellement exclusifs* : la réalisation d'un état de la nature empêche automatiquement la réalisation d'un autre état de la nature.
- *Exhaustifs* : l'ensemble des états du monde contient absolument tous les événements extérieurs susceptibles de se produire.

A partir de  $C$  et  $S$  le décideur construit l'ensemble des actions à choisir qu'on note  $X$ . Formellement,  $X$  est l'ensemble de toutes les fonctions de  $C$  dans  $S$ .

L'axiomatique<sup>7</sup> élaborée par Savage permet au décideur de former une loi de probabilité sur les événements affectant les conséquences et de comparer les espérances de l'utilité suivant cette loi. Le théorème de Savage est une extension de la théorie de Von Neumann et Morgenstern. En effet, la représentation de la relation de préférences est semblable à celle élaborée par VNM, sauf que les distributions de probabilité des différents états de la nature sont évaluées subjectivement.

### **Les limites de la rationalité Individuelle**

De nombreux auteurs ont critiqué la règle de l'espérance de l'utilité prônée par Von Neumann–Morgenstern complétée par Savage. Ces critiques ont d'abord été mises en lumière sous forme de ce

qu'on a appelé des « paradoxes »<sup>8</sup> (d'Allais d'abord, d'Ellsberg ensuite). L'exposé de ces critiques dépasse largement le cadre de ce travail. Toutefois, il est important de signaler qu'il y a un certain nombre de raisons théoriques qui mènent à l'existence de ces critiques. On estime que ces raisons naissent de la façon dont les modèles de la théorie microéconomique sont utilisés dans les applications ; on suppose souvent que le comportement de l'individu est conforme à ce genre de modèle alors que seul un domaine limité de l'ensemble des problèmes de décision du consommateur est modélisé.

Nous nous intéressons particulièrement à la difficulté d'appliquer le théorème de représentation de Von Neumann et Morgenstern sur les loteries de distribution temporelle.

### **La résolution temporelle**

Pour introduire la résolution temporelle nous avons choisi de commencer par un exemple. Considérons un jeu de pile ou face qui offre 10000 (unité monétaire) si face apparaît et n'offre rien si pile apparaît ; trois perspectives sont présentées :

- La première est que le jeu a lieu à la date  $t = 0$  et son résultat est annoncé à la date  $t = 0$ .
- La seconde est que le jeu a lieu à la date  $t = 1$  et son résultat est annoncé à cette date.
- La troisième est que le jeu a lieu à la date  $t = 0$  et son résultat est annoncé à la date  $t = 1$ .

La distribution de probabilité des lots étant la même dans les trois perspectives ; si on applique les modèles de la théorie de la maximisation de l'utilité espérée, les trois perspectives seront classées de manière identique. Mais si on considère d'autres éléments dans le comportement des individus, le classement sera différent. Le meilleur moyen de constater ceci serait de considérer ces jeux comme des distributions de revenu.

Examinons les choix de consommation d'un agent économique concernant ses dépenses durant une période fixée entre deux dates  $t = 0$  et  $t = 1$ . Ces dépenses dépendent des ressources que l'individu possède déjà et celles qu'il pense avoir plus tard.

Deux cas de figure se présentent :

1. Commençons par le cas le plus simple : l'incertitude est levée à la date  $t = 0$ , dans ce cas l'agent économique pourra se servir de l'information pour ajuster ses dépenses à ses ressources.
2. L'incertitude est levée à la date  $t = 1$ . Dans ce cas les ressources de l'individu ne seront plus délivrées

<sup>8</sup> Le paradoxe d'Allais est l'un des plus célèbres remises en cause de la théorie. Il peut être représenté par un exemple très simple. Soit deux perspectives : dans la première, on a à choisir entre gagner 10000 (unités d'utilité) avec 10% de chances (1) ou gagner 15000 avec 9% de chances (2) ; dans la seconde, on a à choisir entre gagner 10000 avec 100% (3) ou gagner 15000 avec 90% (4). La plupart des gens préfèrent (2) à (1), et (3) à (4). Or si on introduit la loterie (5) qui offre 0 avec 100% de chance, on a  $(1) = 0.1 \cdot (3) + 0.9 \cdot (5)$  et  $(2) = 0.1 \cdot (4) + 0.9 \cdot (5)$ . Si l'axiome d'indépendance était respecté, alors nous devrions avoir en même temps (1) préféré à (2) et (3) préféré à (4) ou l'inverse.

<sup>7</sup> Un exposé complet du théorème se trouve dans Luce et Raïffa (1957).

en une seule fois, mais en deux parties : des ressources initiales à la première période et d'autres ressources à la deuxième période.

Deux éléments opèrent ici :

\* L'individu attache de la valeur à l'obtention de l'information plutôt.

\* L'individu s'intéresse à la date à laquelle l'incertitude est levée pour lui et non à celle où l'incertitude est levée dans le jeu.

Ces éléments inciteront l'agent économique à préférer la première perspective aux deux autres.

Spence et Zeckhauser (1972) fournissent une démonstration de l'incohérence des fonctions d'utilité lorsque la date de résolution de l'incertitude compte, autrement dit lorsque l'on attache de l'importance à la résolution temporelle de l'incertitude.

Partant d'un exemple à un horizon de quatre étapes, dont l'une d'entre elles représente la résolution de l'incertitude, ils montrent que lorsque l'on intervertit l'étape de résolution de l'incertitude avec une autre, l'utilité espérée change et ce contrairement à l'hypothèse de Von Neumann et Morgenstern.

À l'issue de ce travail les deux auteurs constatent que le temps est absent des hypothèses de VNM, tout en insistant sur l'importance de celui-ci dans tout problème de décision.

Ceci conduit à conclure la non-légitimité de l'usage du critère de l'utilité espérée comme représentation des préférences obéissant à certains axiomes.

Cependant, partant d'un exemple de distribution temporelle du revenu, Porteus et Kreps (1979a) montrent qu'il est justifié de revenir au théorème de Von Neumann et Morgenstern en fixant certaines hypothèses a priori : la distribution de probabilité sur le revenu de seconde période est donnée et l'ordre de résolution de l'incertitude est fixé.

En admettant ce résultat, on peut construire un cadre utile pour traiter la décision en matière de changement climatique: on peut considérer que la distribution de probabilité sur les impacts physiques du changement climatique est donnée une fois pour toute. Si en plus on suppose que cette distribution est connue, c'est-à-dire qu'on se situe dans un univers risqué, et que la date de l'information est-elle aussi connue.

Néanmoins, les travaux de Kreps et Porteus préviennent qu'il est important d'être prudent pour toute tentative d'extension de ce schéma à des cas où la distribution de probabilité sur les états de la nature futurs et la décision de la première période ne seraient pas indépendantes.

### ***Consistance du critère de la maximisation de l'utilité espérée***

La difficulté d'application du principe de maximisation de l'espérance d'utilité à des situations où les probabilités de réalisation sont subjectives. L'absence du temps dans les modèles de VNM et Savage, développés dans le cadre de ce principe,

conduisent à s'interroger sur la perspective de recourir à un critère de choix autre que celui de la maximisation de l'utilité espérée. Un tel critère doit contribuer à réduire le nombre de paramètres encore indéterminés ; particulièrement les probabilités subjectives. Cependant, cette solution présente des défauts majeurs, nous citons en particulier le fait que l'incertitude sur les probabilités d'occurrence soit une donnée irréductible du problème de changement climatique et par conséquent qu'une telle solution serait incompatible avec le cadre du problème que nous traitons. Depuis quelques années nous avons assisté au développement de nouveaux modèles dans le cadre de la théorie des choix en situation d'incertitude. Ces modèles ont contribué, principalement, à l'amélioration de la théorie dite Non-Expected utility<sup>9</sup>. Nous pouvons citer en particulier, le concept d'aversion pour l'ambiguïté de Gilboa et Shmeidler (1989) ; qui stipule que les agents agissent en prévision du pire, en optant pour la distribution de probabilité la plus défavorable. Mais ces modèles produisent systématiquement des incohérences dès lors que l'on envisage des situations temporelles dynamiques.

### **Formalisation du concept de la valeur d'option**

Revenons à la notion de valeur d'option, nous nous intéressons à la formalisation de cette notion dans le cadre économique de la gestion du problème de changement climatique.

Nous nous situons dans le cadre de la théorie de la maximisation de l'utilité. Nous nous proposons d'analyser le modèle formel élémentaire de la théorie de décision dans l'incertain. L'exemple que nous considérons dans ce paragraphe (d'après le travail de Dasgupta et Heal, 1979) permet de présenter ce modèle.

Considérons un horizon de planification de deux périodes d'une situation décision au sujet de la conservation ou non d'un système. Soit  $t = 0$  et  $t = 1$ , les deux dates représentant les origines des temps de la première et la deuxième période, respectivement.

La décision prise par le planificateur au début de la première période ( $t = 0$ ) permettra au système d'évoluer entre deux états. Le passage d'un état à un autre peut être caractérisé par le concept d'irréversibilité (voir annexe 2).

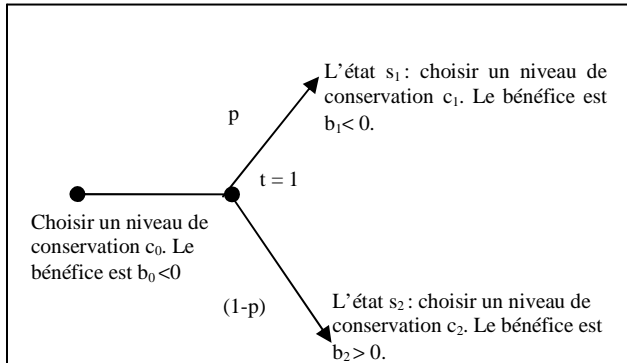
### ***Arbre du problème***

Supposons que nous disposons d'une unité d'un bien environnementale. Le bénéfice de conserver cette unité à l'instant  $t = 0$  est  $b_0$ . À la date  $t = 1$ , l'état de l'environnement est révélé, supposons que

<sup>9</sup> Après les critiques établies par Allais (1953) du principe fondateur de l'utilité espérée, des violations systématiques de l'axiome d'indépendance ont été aperçues empiriquement (Kahneman et Tversky 1979) et défendues de manière normative (Machina 1982). L'ensemble de ces critiques ont mené aux modèles Non-Expected utility.

deux états de la nature  $s_1$  et  $s_2$  peuvent se produire. Les probabilités de réalisation de  $s_1$  et  $s_2$  sont  $p$  et  $(1-p)$ , respectivement. Si l'état de la nature qui prédomine dans la seconde période est  $s_1$ , le bénéfice de conservation est  $b_1$ ; si l'état est  $s_2$ , le bénéfice de conservation est  $b_2$ . Cette situation est résumée par la figure 1.

Figure 1. Analyse de la décision



Nous assumons que le bénéfice de conservation de seconde période est positif si l'état  $s_2$  se réalise,  $b_2 > 0$ . Alors qu'il est négatif si l'état  $s_1$  se réalise,  $b_1 < 0$ . Chaque bénéfice existant dans le problème est remplacé par sa valeur espérée avant d'appliquer le critère de décision.

On cherche les niveaux de conservation  $c_0$ ,  $c_1$  et  $c_2$  qui maximisent le bénéfice espéré du développement  $b_0 c_0 + p b_1 c_1 + (1-p) b_2 c_2$

(On assume que le taux d'actualisation est nul).

On montre que lorsque la décision prise est irréversible il y a une valeur d'option de conservation dans la première période si et seulement si le bénéfice espéré de conservation est positif dans cette période sachant qu'on suit une politique optimale. On compare ceci avec le cas réversible dans lequel on ne conserve jamais dans la première période et il n'y a pas de valeur d'option.

Commençons par exposer le cas où la décision est réversible. Ensuite, on considère le cas alternatif où la décision est irréversible, tout en le comparant avec le premier.

1. Si la décision prise est réversible, ce qui est une alternative hypothétique, la décision faite à l'instant  $t = 0$  ne restreint pas les options disponibles à la date  $t = 1$ . On distingue deux cas :

- La conservation dans la première période procure des bénéfices,  $b_0 > 0$ . Dans ce cas la solution rationnelle serait de conserver dans la première période la totalité du bien environnementale, c'est à dire prendre  $c_0 = 1$ .
- Il n'y a pas de bénéfice de conservation dans la première période,  $b_0 < 0$ . Dans ce cas, la seule incitation à conserver à la date  $t = 0$  serait la

possibilité d'avoir des rendements dans la seconde période. Or la décision est réversible, le planificateur a donc intérêt à ne pas conserver dans la première période, c'est-à-dire prendre  $c_0 = 0$ .

Dans les deux cas, la décision prise dans la première période ne peut pas influencer le choix de la quantité à conserver dans la seconde période, puisqu'elle est réversible. La quantité à conserver dans la seconde période dépend uniquement de l'état de la nature qui prédominera dans la seconde période :

- Si l'état  $s_1$  se réalise, on ne conserve rien,  $c_1 = 0$ .
- Si l'état  $s_2$  se réalise, on conserve la totalité du bien,  $c_2 = 1$ .

2. Considérons à présent le cas alternatif où la décision prise à la date  $t = 0$  est irréversible. Dans ce cas la décision prise dans la première période restreint les options de la seconde période. Particulièrement lorsque la totalité du bien est détruite dans la première période, il n'y aura plus d'option de conservation dans la seconde période. Ainsi, la quantité qui sera conservée au cours de la seconde période ne doit pas dépasser celle conservée à la première période.

De manière formelle ; il faut satisfaire la contrainte

suivante :  $C_2 \geq 0$  et  $C_1 \leq C_0 \leq C_2$

. Ceci étant, quelle est la politique de conservation que nous devons considérer ?

Il est clair que ; si dans la seconde période l'état de la nature qui prédominera est  $s_2$ , le bénéfice de conservation est positif, la quantité à conserver serait la totalité de ce que nous avons conservé dans la première période, c'est-à-dire  $c_2 = c_0$ . Si par contre, l'état de la nature futur est  $s_1$ , le bénéfice de conservation est négatif, on ne conservera rien,  $c_1 = 0$ .

En notant,  $c_2 = c_0$  et  $c_1 = 0$  l'expression du bénéfice espéré est réduite à

$$\{ b_0 + (1-p)b_2 \} c_0$$

Puisque cette expression est linéaire en  $c_0$ , le niveau de conservation initial est positif si et seulement si la dérivée par rapport à  $c_0$ , qui n'est autre que le gain espéré de conservation, est positive, c'est-à-dire ;

$$\{ b_0 + (1-p)b_2 \} \geq 0$$

Ce résultat peut être interpréter comme suit : il est optimal de conserver dans la première période si et seulement si il y a un gain espéré de conservation future. Si nous comparons ceci avec le cas où on choisit de ne pas conserver dans la première période, lorsque la décision est réversible. Nous constatons que les deux situations sont différentes lorsque le gain espéré de la première période est positif. Dans ce cas il y a une valeur d'option de conservation comme moyen de préserver la ressource jusqu'à la seconde période et profiter de l'information future.

### **Signe de la valeur d'option**

*Propriété 1.* Le signe de la valeur d'option ne dépend que du scénario le plus défavorable. Ce principe est connu sous le nom du principe des mauvaises nouvelles.

Thierry Chapuis (1996) établit les conséquences de ce principe dans le cas du problème de réchauffement comme suit :

- Les bonnes nouvelles n'ont aucune incidence sur la décision, les mauvaises informations vont quant à elles augmenter la valeur d'option et donc augmenter les mesures préventives au changement climatique et les investissements en économie d'énergie.

- La valeur d'option décroît avec certitude. Si l'avenir devient moins incertain, l'écart entre la valeur moyenne et les mauvaises nouvelles diminue et la valeur d'option décroît. En conséquence et même si l'on considère que la société est neutre au risque, les mesures préventives à l'effet de serre et les investissements en économie d'énergie seront plus forts si l'incertitude venait à augmenter.

### **Conclusion**

L'existence d'une valeur d'option dépend : premièrement, de l'irréversibilité de la décision ; deuxièmement, du fait que le retardement de la décision en vue de profiter de l'acquisition de nouvelles informations ; et finalement, du fait qu'en moyenne il y aura des bénéfices de conservation de la première période étant donné qu'on choisit la politique optimale.

### **L'Actualisation**

Le taux d'actualisation est particulièrement important lorsqu'il s'agit de questions qui se rapportent à l'environnement : par exemple, dans un projet de limitation de la pollution les coûts de réduction des émissions de Gaz à Effet de serre sont supportés actuellement ; alors que les bénéfices seront reçus dans un avenir illimité.

### **En théorie**

Dans un marché pur et parfait le taux d'actualisation ou le taux d'intérêt reflète : d'une part, le taux subjectif de préférence pur pour le présent (des individus privés) et d'autre part le taux de productivité du capital. Ces taux sont ajustés par le marché, afin que le taux qui correspond à la disposition des individus à échanger les valeurs du présent pour ceux du futur soit égal au taux qui leur permet de déplacer des ressources présentes (dans la forme de renoncer à la consommation) pour financer des biens futurs (à travers l'investissement du capital). Le choix d'un taux d'actualisation approprié aux investissements suscite beaucoup de discussion surtout dans le cadre des disciplines qui s'intéressent à l'environnement. Le débat sur la

motivation éthique de l'actualisation future remonte aux travaux de Pigou (1920) et Ramsey (1928). Dans son article fondateur de la théorie de la croissance, Frank Ramsey utilise en effet un critère actualisé. Il choisit alors un taux d'actualisation de l'utilité égale à zéro. L'argument éthique et philosophique qu'il présente en faveur d'un taux de « préférence pure pour le présent » nul est que toutes les générations devraient être traitées sur un pied d'égalité. D'un autre côté, d'autres économistes ont montré qu'un taux de préférence pour le présent positif, est nécessaire pour une représentation précise des préférences sur un horizon infini (Koopmans, 1960). Néanmoins, ils ont mis en doute une préférence nulle pour le présent. L'argument qu'ils présentent est qu'un taux d'actualisation suffisamment élevé est essentiel pour éviter de traiter injustement les générations présentes. Selon Mirrlees (1967), les générations actuelles risquent d'avoir une consommation extrêmement infime par personne sous un taux d'actualisation nulle. Pour comprendre cet argument, observons la situation étudiée par Arrow (1996). On part du cadre d'analyse de Koopmans (1960), c'est-à-dire on considère une économie stationnaire. Les choix du consommateur sont, par la suite, basés sur le classement des préférences pour des flux de consommation de dimension infinie. Koopmans démontre que si les préférences sont continues et sensibles (c'est-à-dire, que si un flux régulier de biens n'est jamais pire et s'il est meilleur par une ou plusieurs périodes, alors il doit être strictement préféré), alors ils affichent une préférence pour le présent. Arrow commence par fixer, à chaque période, un flux régulier de biens qui ne peuvent être consommés que durant cette période. Supposant que ; la génération présente disposait d'une opportunité d'investissement qui ne se reproduira pas, il fait correspondre à chaque unité investie un revenu  $\alpha$  par unité de temps qui sera fixé dans l'avenir. Chaque unité investie procure une perte d'utilité pour la génération présente, mais pour compenser, il y aurait un revenu très faible par rapport à l'investissement initial, mais qui durerait éternellement.

*En l'absence de préférence temporelle (un taux d'escompte nulle), quelle serait la solution optimale ?*

Elle devrait être d'investir la totalité de son revenu, et rester sans aucune ressource. Toute perte de bien-être de la génération présente sera, par la suite, compensée par le gain en bien-être de plusieurs générations futures. Cette situation ne peut pas correspondre à la réalité, aucune génération ne peut accepter de tels sacrifices.

Un taux d'actualisation élevé peut être, cependant, discriminant à l'égard des générations futures. En effet, contrairement aux investissements qui procurent des bénéfices nets de court terme, les investissements qui procurent des bénéfices de long

terme seront moins considérés dans le cas de taux d'actualisation élevée. Pour illustrer ; examinons l'exemple donnée par G. Heal sur la valeur présente du dollar à travers plusieurs dates dans le futur, actualisé à 5% et 10%, il est clair que le dollar perd plus sa valeur, à travers les années, avec le taux d'actualisation le plus élevé (10%), il est par la suite évident que les générations futures souffriront des taux d'actualisation déterminés par des taux de préférence pour le présent élevés. Une autre évidence se dégage de l'exemple ci-dessus : le bénéfice net se produisant dans plus d'un demi-siècle est négligeable, cependant la plupart des menaces environnementales exigent de considérer un horizon de temps supérieur à un siècle.

Résumons ce débat ; d'un côté, choisir un « taux de préférence pour le présent » nul paraît inacceptable pour les générations présentes – il est inadmissible, selon Arrow, qu'une génération quelconque puisse être amenée à sacrifier la totalité de son revenu. D'un autre côté, choisir un taux de préférence pour le présent élevé risque de créer une asymétrie de traitement entre la génération présente et future – particulièrement, celle très loin dans le futur. Cette asymétrie est inquiétante surtout quand il s'agit de traiter des problèmes environnementaux tel que le changement climatique puisque les conséquences de ceux-ci apparaîtront dans le très long terme (un siècle et même plus) ; il est clair qu'à tout taux d'actualisation positif ces conséquences seront sous-estimées dans les évaluations des projets.

Arrow traite des modèles de croissance qui s'inspirent des raisonnements de Ramsey (1928) et Koopmans (1960). Dans ces modèles, il propose le taux d'actualisation suivant qui selon lui satisfait les discussions tenues :

$$\delta = d + g * n$$

avec  $d$  : la préférence pour le présent.

$g$  : le taux de croissance projeté dans le future.

$n$  : une constante qui représente l'élasticité inter temporelle de l'utilité marginale de la consommation, qui vaut 1 lorsque l'utilité utilisé est logarithmique.

Par cette expression, Arrow introduit<sup>10</sup> un autre aspect de l'actualisation : l'effet richesse ou décroissance de l'utilité marginale du revenu qui implique, si nous anticipons une croissance économique positive, qu'un investissement d'une unité de biens dans le présent aura moins de valeur en termes d'utilité.

### Au plan pratique

Les hypothèses considérées pour la recherche d'un taux d'actualisation approprié deviennent fictives. En effet, d'une part, l'économie ne fonctionne ni en concurrence pure et parfaite ni sur un chemin de croissance optimale d'un modèle de croissance.

D'autre part, un ensemble d'évidences indique que les individus classent leurs préférences pour le présent suivant une structure différente de celle utilisée par les modèles standards, c'est à ce problème que nous nous intéressons à présent.

*Le comportement individuel.* Dans le cas d'un marché parfait les agents règlent leurs échanges jusqu'à ce que leur taux marginal de substitution entre la consommation d'aujourd'hui et celle de demain soit égal au taux d'actualisation. Néanmoins, il y a un ensemble d'évidences empiriques sur les taux d'actualisation qui suggèrent que sur le plan pratique, les individus appliquent une procédure d'ajustement de leur consommation qui n'est pas forcément conforme à la théorie économique.

La plupart des comportements<sup>11</sup> observés ont montré que le taux d'actualisation que les individus appliquent à leurs investissements futurs dépend de, et décroît avec, la durée du projet. Ce résultat est assez naturel, en effet, un ajournement d'une année à partir de l'année prochaine à l'année d'après, est différent d'un ajournement à partir de cinquante à cinquante et une années : le premier ajournement double la durée d'attente alors que le second le fait augmenté de 2% ; malgré que tout les deux représente un ajournement d'une année, le premier représente un changement majeur, tandis que le second est faible. Ainsi la réaction des individus à un ajournement d'un paiement ou d'un coût, étant donné une période de temps, est inversement proportionnelle à sa durée dans le futur. Autrement dit on réagit de manière proportionnelle plutôt qu'absolument croissante par rapport à la durée de temps ; On identifie ce résultat par « actualisation hyperbolique » (hyperbolic discounting).

On peut formaliser l'idée qu'une augmentation donnée dans le nombre d'année d'un événement dans le futur a un impact qui est inversement proportionnel à la distance dans le futur sur le taux d'actualisation comme suit :

$$\delta(t) = \frac{1}{\Delta} \frac{\partial \Delta}{\partial t} = \frac{k}{t} \text{ ou } \Delta(t) = e^{k \log t} = t^k$$

$\forall k$  une constante négative.

où  $\Delta(t)$  est un facteur d'actualisation.

On désigne ceci par « actualisation logarithmique » (logarithmic discounting).

L'actualisation logarithmique à un taux d'actualisation donné introduit plus de poids sur le long terme que ne le fait l'approche classique ; actualisation exponentielle à un taux constant. Cette approche s'avère, pour la plupart des économistes, plus consistante avec les comportements individuels et les évaluations sociales.

<sup>10</sup> Cet aspect a été introduit par l'économiste Eugen Von Böhm-Bawerk en 1887. (Arrow, 1996)

<sup>11</sup> Le lecteur intéressé à la question peut consulter le travail de Richard Thaler (1981) ; « Some Empirical Evidence On Dynamic Inconsistency », *Economic Letters*, 8, 201-207. Celui-ci développe une étude empirique traitant les taux d'actualisation implicites dans les décisions individuelles.

## Modélisation du Problème de gestion du Changement Climatique

Jusqu'ici nous nous sommes intéressés à l'ampleur des controverses que soulève le dessein de politiques de gestion du problème de changement climatique. Nous nous proposons à présent d'explorer ce champ de recherche en développant un modèle simple dont l'objectif est d'articuler les différents éléments du problème climatique en un seul objet.

Dans la littérature, la plupart des analyses du comportement sous incertitude place le décideur dans un cadre de choix binaire. Dans l'approche la plus simple, on considère deux périodes, représentant un choix à court terme et un choix à long terme. On assume que la décision est prise dans la première période et qu'elle est soumise à l'incertitude au sujet de l'environnement qui prédominera à la deuxième période. Dans l'approche la plus simple, deux états du monde sont possibles. Au début de la seconde période, l'information arrive d'un seul bloc, l'état réel de l'environnement devient connu et probablement plusieurs autres décisions seront prises.<sup>12</sup>

Nous nous proposons d'analyser le modèle formel élémentaire de la théorie. Nous essaierons de nous situer dans le cadre de l'économie classique en imposant des hypothèses simplificatrices aux différents éléments constituant le problème de gestion du changement climatique.

Considérons une société dont le revenu d'un individu représentatif est  $I$ . Le bénéfice produit par ce revenu est représenté par la fonction d'utilité de la société  $u(I)$ , fonction croissante de  $I$  à un taux décroissant. Cette fonction est supposée doublement continûment dérivable.

L'occurrence du changement climatique et des événements qui peuvent suivre affectera brutalement et définitivement le bien être de cette société. Soit  $C$  la date d'occurrence de cet événement ; nous avons supposé que cette date est parfaitement connue par le planificateur. De ce fait, la période de planification se découpe naturellement en deux périodes. Chronologiquement, la première période correspond à celle précédant la date  $C$ , au cours de laquelle le planificateur ne dispose que d'une information partielle sur la nature des dommages du changement climatique. Au début de la seconde période la véritable nature, des dommages, sera révélée et l'incertitude sur l'état de la nature sera dissipée. Nous avons envisagé deux états de la nature :

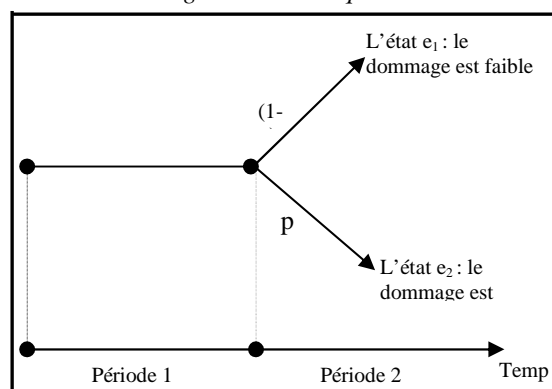
1.  $e_1$  : un changement climatique faible n'entraînant que des dommages éphémères.
2.  $e_2$  : un changement climatique intense entraînant des dommages importants.

Les dommages associés à ces états peuvent prendre leurs valeurs dans l'ensemble  $\{w, W\}$  ; avec  $w$  et  $W$  sont les valeurs des dommages associés aux états  $e_1$  et  $e_2$ , et  $w < W$ .

Initialement, le planificateur estime que la probabilité de réalisation de l'état entraînant des dommages importants  $e_1$  est  $(1-p)$ , et que la probabilité d'occurrence de l'état  $e_2$  est  $p$ .

La figure ci-dessus représente ce problème de décision :

Figure2. Schéma du problème de décision en matière de changement climatique.



Le planificateur a le choix entre deux décisions à un horizon de deux périodes :

1. « Ne rien faire et attendre l'arrivée d'une nouvelle information », ce qui constitue une solution irréversible.
2. « Prendre des mesures de prévention dès aujourd'hui » ce qui correspond à un choix une fois pour toute, la décision est réversible: elle permettrait de répondre plus rapidement et à moindre coût  $x$  (ce coût sera supporté durant la première période) à une éventuelle modification du climat en préparant le système climatique à une conversion plus rapide. Cette action permettrait de réduire les dommages en seconde période d'une valeur égale à  $m$  ou  $M$  selon que l'état de nature est faible ou fort.

⇒ *Quel coût doit-on supporter pour éviter le changement climatique?*

Après le changement climatique, le revenu de la société est susceptible de décroître de  $I$  à  $I_j$  ( $I_j < I$ ); où  $j$  indique l'état de l'environnement suite au changement climatique,  $j = 1, 2$ . On pose  $I_1 = I - w$  ET  $I_2 = I - W$ .

L'information reçue au début de la seconde période vient confirmer les estimations du planificateur quand à la réalisation des événements.

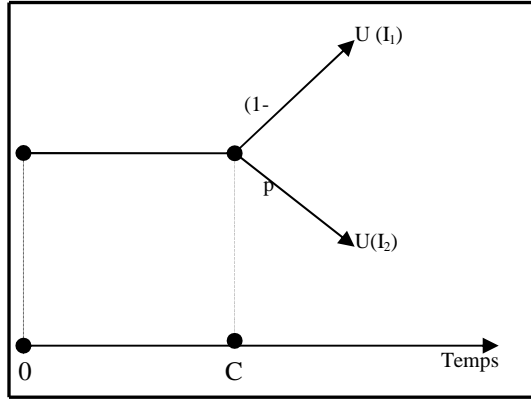
<sup>12</sup> La situation plus générale où des  $n > 1$  décisions seront prises de manière séquentielle et sujet à l'amélioration de l'information sur l'état du monde représente un domaine de recherche intéressant qui a été rarement entrepris. L'étude faite par Larry G. Epstein ; « Decision Making And The Temporal Resolution of Uncertainty », International Economic Review, vol21, n°2, June 1980, offre plus de détails sur cette situation.



Nous allons ramener les utilités en fonction des revenus afin de pouvoir utiliser la méthode de VNM tel que l'a suggéré Kreps et Porteus.

Ce problème peut être représenté comme suit:

Figure 5.2. Incertitude sur les états de la nature.



Résumons un peu le cadre d'analyse du problème : la distribution de probabilité des états de l'environnement de seconde période est donnée et l'ordre de résolution de l'incertitude est fixé. Ceci nous autorise à se placer dans le cadre de la théorie de la maximisation de l'utilité espérée.

Connaissant la date d'occurrence du changement climatique, mais ignorant l'intensité du phénomène, l'espérance de gain de bien être vaut (assumant un taux d'actualisation nul):

$$p u(I_2) + (1-p) u(I_1) \quad (1)$$

La valeur d'option est alors obtenue en comparant la valeur espérée du gain (avec information) avec le gain dans les mêmes circonstances mais sans information:

$$p u(I_2) + (1-p) u(I_1) - u(pI_2 + (1-p)I_1) \quad (2)$$

D'après le principe de la mauvaise nouvelle, des mesures préventives seront prises si la valeur d'option traduit des mauvaises informations, c'est-à-dire si le signe de la valeur d'option est négatif.

Ainsi la société acceptera de payer un coût de prévention si:

$$p u(I_2) + (1-p) u(I_1) - u(pI_2 + (1-p)I_1) < 0 \quad (3)$$

ou

$$u(pI_2 + (1-p)I_1) > p u(I_2) + (1-p) u(I_1) \quad (4)$$

Ceci peut être interpréter comme suit ; pour que la société accepte d'investir dans des mesures préventives il faut qu'elle soit averse au risque.

A ce niveau du travail, nous avons supposé qu'il existe une technologie qui permettrait de s'adapter aussi rapidement que possible à des énergies non fossiles et par la suite d'éviter que le changement

climatique se produise. Soit  $x$  le coût de cette technologie (au fur et à mesure que ces technologies se développent ce coût diminue ; il est nul quand le changement climatique se produit). Nous avons supposé que la société accepte de payer ce coût.

Soit  $0 \leq \delta \leq 1$  le poids que nous attribuons aux coûts ou bénéfices à la date  $t+1$  relativement à ceux à la date  $t$ . Ainsi,  $\delta^{t-1}$  est le poids attribué à ceux à  $t$  relativement à la date 1, alors  $(1-\delta) \times 100$  est le taux d'actualisation en pourcentage.

Nous avons choisis un  $\delta \geq 0$  par référence à la théorie de l'actualisation et ses objectifs d'équité et d'efficacité.

\* L'utilité espérée après le changement climatique est décrite par l'expression suivante:

$$p u(I_2) + (1-p) u(I_1) \quad \text{ou} \quad p u(I-W) + (1-p) u(I-w)$$

\* la valeur espérée de la perte pour une période de temps égale à une année, si le changement climatique se produit est défini par:

$$u(I) - [p u(I_2) + (1-p) u(I_1)] \quad \text{ou} \quad u(I) - [p u(I-W) + (1-p) u(I-w)]$$

\* La somme des valeurs espérées des pertes lorsque le changement climatique se produit, actualisée au présent est:

$$\sum_{t=C+1}^T \delta^{t-1} \{u(I) - [p u(I_2) + (1-p) u(I_1)]\} \quad (5)$$

\* la perte d'utilité qu'on doit supporter chaque année lorsqu'on accepte de payer  $x$  est:

$$u(I) - u(I-x)$$

La somme des pertes qu'on doit supporter d'ici jusqu'à  $C$  est:

$$\sum_{t=1}^C \delta^{t-1} [u(I) - u(I-x)] \quad (6)$$

La prime maximale (voir annexe 3) que la société accepte de supporter vérifie:

$$\sum_{t=1}^C \delta^{t-1} [u(I) - u(I-x)] = \sum_{t=C+1}^T \delta^{t-1} \{u(I) - [p u(I_2) + (1-p) u(I_1)]\} \quad (7)$$

Etant donné cette expression nous avons examiné la sensibilité de la valeur du coût à la distribution de probabilité des impacts du changement climatique, le revenu et la richesse initiale.

### Impact d'une variation de la probabilité

Le différentiel de l'expression (3) par rapport à  $x$  et  $p$  donne:

$$\begin{aligned} \sum_{t=1}^C \delta^{t-1} [u'(I-x)dx] &= \\ \sum_{t=C+1}^T \delta^{t-1} \{ [u(I_1) - u(I_2)] dp \} \\ \frac{dx}{dp} &= \frac{u(I_1) - u(I_2)}{u'(I-x)} \frac{\sum_{t=C+1}^T \delta^{t-1}}{\sum_{t=1}^C \delta^{t-1}} \end{aligned}$$

Cette expression est positive puisque la dérivée de  $u$  est positive. Ce résultat implique qu'une société averse au risque est prête à payer plus lorsque la probabilité d'occurrence du phénomène augmente.

### Impact d'une variation du revenu ; le dommage est maximal

Le différentiel de l'expression (3) par rapport à  $x$  et  $I_2$  donne:

$$\begin{aligned} \sum_{t=1}^C \delta^{t-1} [u'(I-x)dx] &= \\ \sum_{t=C+1}^T \delta^{t-1} \{ [-p u'(I_2)] dI_2 \} \\ \frac{dx}{dI_2} &= \frac{-p u'(I_2)}{u'(I-x)} \frac{\sum_{t=C+1}^T \delta^{t-1}}{\sum_{t=1}^C \delta^{t-1}} \quad (8) \end{aligned}$$

Cette expression peut s'interpréter comme suit: une société averse au risque est prête à payer plus si le revenu de la seconde période diminue.

Ce résultat est aussi vérifié lorsque le dommage est faible ; le différentiel de l'expression (3) par rapport à  $x$  et  $I_1$  donne une expression négative:

$$\frac{dx}{dI_1} = \frac{-(1-p) u'(I_1)}{u'(I-x)} \frac{\sum_{t=C+1}^T \delta^{t-1}}{\sum_{t=1}^C \delta^{t-1}} \quad (9)$$

### Impact de la variation de la richesse initiale:

Le différentiel de l'expression (3) par rapport à  $x$  et  $I$  donne :

$$\frac{dx}{dI} = \frac{\sum_{t=C+1}^T \delta^{t-1} u'(I) - \sum_{t=1}^C \delta^{t-1} [u'(I) - u'(I-x)]}{\sum_{t=1}^C \delta^{t-1} u'(I-x)} \quad (10)$$

Le signe de l'expression (10) dépend exclusivement de son numérateur puisque la dérivée de  $u$  est strictement positive.

Soit

$$E(x) = \sum_{t=C+1}^T \delta^{t-1} u'(I) - \sum_{t=1}^C \delta^{t-1} [u'(I) - u'(I-x)]$$

La fonction est dérivable ;

$$E'(x) = \sum_{t=1}^C \delta^{t-1} u''(I-x)$$

La dérivée de la fonction  $E$  est négative puisque la dérivée seconde de la fonction d'utilité est négative selon le principe de la maximisation de l'utilité.

La disposition à payer dans ce cas est nulle ;  $x = 0$

Il est clair que  $0 \leq x \leq I$  et on a ;

$$E(0) = \sum_{t=C+1}^T \delta^{t-1} u'(I)$$

$$E(I) = 0$$

Nous avons pu conclure que

$$E(0) \geq 0 \quad \forall 0 \leq x \leq I$$

L'expression (10) est par conséquent positive ; nous sommes prêts à payer plus suite à une variation positive de la richesse initiale. Ainsi la disposition à payer varie proportionnellement avec la richesse.

A l'issue de ce travail, il apparaît que lors de la construction de politique climatique il importe de mieux prendre en compte d'abord, au sein du cadre théorique existant, les éléments clés du problème climatique tel que les incertitudes, l'arrivée de l'information et les attitudes face au risque.

### Conclusion

Dans cet article nous avons tenté de mettre en évidence les difficultés qui tendent à obscurcir le débat sur les politiques de gestion du problème du changement climatique. Nous avons surtout invoqué la présence de points de vue fondamentalement critiques. Nous nous sommes intéressés, ensuite, aux instruments économiques susceptibles d'aboutir à la construction de politiques de gestion du problème du changement climatique. Face à la complexité de ces instruments et à la multiplicité des discours qui s'y rapportent, nous avons choisi d'adopter une progression du plus simple au plus complexe.

Pour y voir plus clair nous avons tenté de construire un modèle simple permettant de clarifier les enjeux du problème. Nous nous sommes placés dans le champ de l'évaluation coûts bénéfices ce qui nous a fourni un cadre logique adapté pour intégrer dans une même analyse plusieurs éléments qui concourent à la décision en matière de changement climatique. Principalement, les incertitudes qui caractérisent le problème du changement climatique.

## Annexes

### Annexe 1 : critères de décision

On se place dans le même cadre d'analyse de la décision sous risque. Chaque individu possède une fonction d'utilité  $u(.)$  définie sur l'ensemble des conséquences  $C$ . Il choisit une perspective  $s$  dans l'ensemble  $S$ , sachant que la conséquence de cette perspective dépend de la réalisation d'un état de la nature  $a$  parmi l'ensemble  $A$ .

*Le critère de Maximin* : ce critère propose de choisir la perspective dont l'utilité dans le pire des cas est la plus élevée, formellement ;

$$\text{Max}_{s \in S} \text{Min}_{a \in A} u(s(a))$$

*Le critère de Maximax* : ce critère est l'inverse du précédent, il consiste à choisir la perspective dont l'utilité dans le cas le plus favorable est la plus élevée, soit formellement ;

$$\text{Max}_{s \in S} \text{Max}_{a \in A} u(s(a))$$

*Le critère de minimax-regret* : ce critère a été proposé par Savage en 1951 dans le but d'améliorer le critère de Maximin. Il consiste à construire, à partir de la matrice des conséquences, une matrice des « regrets », c'est à dire ; faire la différence, pour chaque état de la nature  $a_j$ , entre l'utilité de la conséquence la plus favorable et l'utilité de la conséquence de la perspective  $s_i$  considérée. Le critère de minimax-regret préconise alors de choisir la perspective dont le regret maximum est minimal ; On définit, en premier lieu, la matrice des regrets

$$r_{ij} = [\text{Max}_k u(s_k(a_j))] - u(s_i(a_j))$$

Ensuite,  $\text{Min}_i \text{Max}_j r_{ij}$

*Le critère de Hurwicz* : proposé par Hurwicz en 1951, ce critère consiste à indiquer chaque perspective par la moyenne pondérée de l'utilité entre la pire et la meilleur des conséquences.

Soit  $\alpha (0 \leq \alpha \leq 1)$  le coefficient de pondération, le  $\alpha$ -critère s'écrit alors :

$$\text{Max}_{s \in S} \{ \alpha [\text{Min}_{a \in A} u(s(a))] + (1 - \alpha) [\text{Max}_{a \in A} u(s(a))] \}$$

### Annexe 2 : Cadre Formel du Concept d'Irréversibilité

Soit,  $A$  l'état du système à la date  $t = 0$ , et  $B$  l'état du système à la date  $t = 1$ . Notons,  $E(A)$  l'ensemble des états qu'il est possible d'atteindre à partir de  $A$ , et  $E(B)$  l'ensemble des états qu'il est possible d'atteindre à partir de  $B$  à la date  $t = 2$ .  $E(.)$  décrit

l'ensemble des états atteignables à partir d'un état donné.

Examinons, à présent le concept d'irréversibilité de manière formelle et ensembliste.

\* *Flexibilité, Irréversibilité Absolue et Irréversibilité des Choix*<sup>13</sup> :

Soit ;

$$E(A) = \{A, B, C\}$$

$$E(B) = \{B\}$$

$$E(C) = \{C, A\}$$

$A \rightarrow B$  : action de passer de  $A$  vers  $B$ .

*Irréversibilité absolue* :  $A \rightarrow B$  est irréversible ssi

$$A \notin E(B).$$

En ce sens, dans l'illustration ci-dessus  $A \rightarrow B$  est irréversible mais pas  $A \rightarrow C$  ni  $A \rightarrow A$ .

*Irréversibilité des choix* :  $A \rightarrow B$  est irréversible ssi

$\exists C \in E(A)$  tel que :  $E(B)$  ne contient pas  $E(C)$ . En ce sens, dans l'illustration ci-dessus  $A \rightarrow B$  et  $A \rightarrow C$  sont tous deux irréversible, mais pas  $A \rightarrow A$ .

*Flexibilité* : définissons la flexibilité comme une relation d'ordre sur des ensembles atteignables, le diagramme illustrant deux cas simples (la relation d'ordre choisie est l'inclusion) :

$B$  n'est pas flexible du tout ssi  $E(B)$  comprend un seul élément.

$A$  est plus flexible que  $B$  ssi  $E(A)$  est plus grand que  $E(B)$ .

\* *Extensions*

A travers les propriétés que nous venons d'examiner nous pouvons décrire l'évolution du système par le concept de l'irréversibilité en examinant l'ensemble des états atteignables.

Il est clair que l'état  $B$ , par exemple, est dans  $E(A)$ . Mais il serait utile de savoir si l'état  $A$  se trouve dans  $E(B)$  ;

– Si l'état  $A$  est dans  $E(B)$  ; l'évolution de  $A$  vers  $B$  est dite réversible.

– Si l'état  $A$  n'est pas dans  $E(B)$  ; l'évolution de  $A$  vers  $B$  est dite irréversible.

### Annexe 3 : attitude face au risque

Toute discussion de politique publique dans un univers incertain doit saisir le problème de détermination de l'attitude appropriée du décideur face au risque. (Arrow et al, 1974)

La fonction d'utilité de Von Neumann Morgenstern permet de décrire le comportement de l'individu et reflète son attitude face au risque. L'objectif de ce paragraphe est de décrire l'attitude de l'individu

<sup>13</sup> La source des définitions présentée dans ce paragraphe est : Minh Ha Duong, «Comment tenir compte de l'irréversibilité dans l'évaluation du changement climatique ?» Thèse de doctorat en Analyse et Politique Economiques, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, 3 avril 1998.

face au risque. Une façon simple de procéder consiste à examiner trois configurations.

Soit  $a$  et  $b$  de  $C$ , dont les probabilités de réalisation respectives sont  $\alpha$  et  $(1-\alpha)$  tel que  $\alpha \in [0,1]$ . On note  $\delta_a$  et  $\delta_b$  les loteries qui accordent avec certitude les loteries  $a$  et  $b$ .

Proposition 1. le préordre complet  $\succ$  sur  $S$  induit sur l'ensemble des résultats  $C$  une relation  $\succ_c$  définie par  $\forall x$  et  $y, x \succ_c y \Leftrightarrow \delta_x \succ \delta_y$ .  
Où  $\delta_x$  et  $\delta_y$  sont les loteries certaines en  $x$  et  $y$

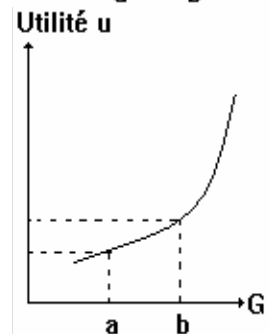
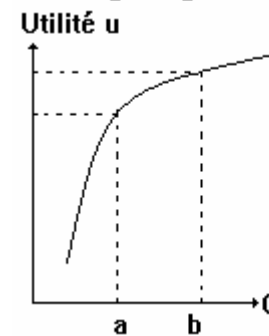
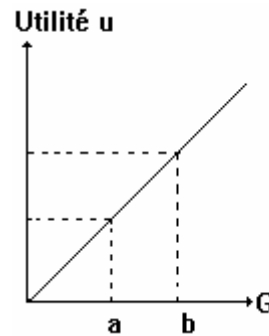
Supposons qu'un individu A est doté d'une richesse initiale  $W$ , cet individu s'intéresse à une loterie  $l = \alpha\delta_a + (1-\alpha)\delta_b$ . Il a le choix entre cette loterie et sa valeur actuarielle (c'est à dire sa valeur espérée)  $E_l = \alpha a + (1-\alpha)b$ ; on note  $\delta_{E_l}$  la loterie qui accorde avec certitude la loterie  $E_l$ . Arrow (1971) distingue trois aspects de l'attitude de l'individu:<sup>14</sup>

1. s'il est indifférent entre les deux loteries  $l \sim \delta_{E_l}$ , il est *neutre au risque*.
2. s'il préfère le gain certain  $\delta_{E_l} \succ l$ , il est *averse au risque* ou *risquophobe*.
3. s'il préfère la loterie  $l \succ \delta_{E_l}$ , il *aime le risque* ou *risquophile*.

On peut exprimer ces définitions, respectivement, comme suit:

1.  $u(E_l) = E(u(l))$
2.  $u(E_l) > E(u(l))$
3.  $u(E_l) < E(u(l))$

Graphiquement, ces trois conditions peuvent être représentées comme suit:



Dans le premier cas, la fonction d'utilité de Von Neumann Morgenstern est linéaire (la dérivée seconde de la fonction d'utilité est nulle); dans le second, elle est concave (sa dérivée seconde est négative); dans le troisième, elle est convexe (sa dérivée seconde est positive).

#### $\Rightarrow$ Equivalent certain

On dit que  $C(l)$  est l'équivalent certain de  $l$  si  $C(l)$  correspond à la valeur certaine donnant à l'individu le même niveau d'utilité de sa richesse finale.

Formellement:

$C(l)$  tel que  $u(C(l)) = \alpha u(a) + (1-\alpha)u(b)$

Dans ce contexte nous pouvons caractériser l'attitude de l'individu comme suit :

1. Si  $C(l) \leq E_l$ , l'individu est averse au risque.
2. Si  $C(l) = E_l$ , l'individu est neutre face au risque.
3. Si  $C(l) > E_l$ , l'individu préfère le risque.

#### $\Rightarrow$ Aversion absolue pour le risque

Nous supposons que l'individu A est averse au risque ; il préfère obtenir l'espérance mathématique d'une loterie actuariellement équitable plutôt que la

<sup>14</sup> Eric Briys. «Demande d'assurance et microéconomie de l'incertain», Presses Universitaires de France, 1<sup>ère</sup> édition : 1990, Janvier.

loterie, il est même prêt à payer une *prime de risque* pour se débarrasser du risque qu'elle comporte. La fonction d'utilité  $u$  de Von Neumann Morgenstern que nous considérons est une fonction strictement croissante, concave et au moins deux fois continûment dérivable.

On appelle prime de risque la différence  $E_l - C(l)$  de 1. La prime maximale que  $A$  acceptera de payer est donnée par l'expression:

$$E[u(W + l)] = u[W + E(l) - R(l)] \quad (1)$$

*Définition* : Etant donnée une fonction d'utilité  $u$  (deux fois continûment dérivable, concave, strictement croissante), la mesure d'aversion absolue pour le risque (ARA) d'Arrow – Prat est :

$$ARA = - \frac{u''(W)}{u'(W)}$$

Une interprétation donnée par Briys (1990) à cette mesure est : ARA traduit la manière dont l'individu réagit en contexte d'incertitude lorsque sa richesse initiale se modifiant, le risque auquel il fait face reste identique.

Cette mesure possède les propriétés suivantes :

1. ARA est positive lorsque l'individu est averse au risque, elle est nulle lorsque celui-ci est neutre, et négative lorsqu'il aime le risque.
2. Elle est plus grande quand il s'agit d'individu fortement averse au risque que pour un individu faiblement averse au risque.
3. ARA est insensible à toute variation linéaire arbitraire de la fonction d'utilité.

⇒ *Aversion relative pour le risque* :

Cette mesure est très utilisée dans les études empiriques, elle a été proposée par Prat.

On raisonne à présent en terme relatif, la prime de risque maximale se formule comme suit :

$$u[W - R_l W] = E[u(W + lW)] \quad (2)$$

L'aversion relative au risque (RRA) est mesurée par :

$$RRA = - W \frac{u''(W)}{u'(W)}$$

Elle indique l'attitude de l'individu, dans une situation d'incertitude, suite à une modification de sa richesse initiale et du risque auquel il fait face par un identique facteur proportionnel.

## Bibliographie

**Arrow, K.J.** "Intergenerational Equity and The Rate of Discount in long-term Social Investment", IEA World Congress, December 1995. Stanford, Department of Economics, Working Paper 97-005. <http://www-econ.stanford.edu/faculty/workp/swp97005.html>.

----- "Discounting, Morality, and Gaming", 24 December 1996, EMF-RFF Conference on Discounting. <http://www-econ.stanford.edu/faculty/workp/swp97004.pdf>

**Arrow, K.J. ET Fisher, A.C.** "Environmental Preservation, Uncertainty and Irreversibility", *Quarterly Journal of Economics*, May 1974, 88(2), 312-319.

**Arrow, K.J. ; Daily, G. ; Dasgupta, P. ; Levin, S. ; Mäler, K.G. ; Maskin, E. ; Starrett, D. ; Sterner, T. et Tietenberg, T.** "Managing Ecosystem Resources", October 1999, Department of Economics, Department of Biological Sciences, Stanford University, Faculty of Economics and Politics, Cambridge University, Department of Ecology and Evolutionary Biology, Princeton University, The Beijer Institute, The Royal Swedish Academy of Science, Department of Economics, Harvard University, Resources for the Future, and Department of Economics, Colby College. <http://www.colby.edu/personalthieten/Mneco.pdf>

**Beltratti, A.G. ; Chichilnisky, G. ET Heal, G.** "Sustainable Growth and the Green Golden Rule", forthcoming in I. Goldin and A. Winters (eds), *Approaches to Sustainable Economic Development*, OECD, Paris, 1994. <http://www.columbia.edu/cu/business/wp/95/pw-95-17.pdf>

**Eric Briys.** "Demande d'assurance et microéconomie de l'incertain", Presse universitaire de France, 1<sup>re</sup> édition : 1990, Janvier.

**Chapuis, T.** « Les problèmes de décision et le changement global : les leçons de la modélisation en économie de l'énergie », *Thèse de doctorat en Sciences Economiques*, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, 1996, 385p. <http://www.centre-cired.fr/intranet/memthese.htm>

**Chichilnisky, G. ; Heal, G. et Beltratti, A.** "The Green Golden Rule", *Columbia Business School* 1994, *Economics Letters*, 1995, 49, 175-179.

**Chichilnisky, G. ET Heal, G.** "Global Environmental Risks", *Journal of Economic Perspectives*, 1993, 7, 65-86.

**Committee on the Science of Climate Change Division on Earth and Life Studies. National Research Council. NATIONAL ACADEMY PRESS. Washington, D.C.** "Climate Change Science: an Analysis of Some Key Questions", 2001. <http://www.nap.edu>

**Epstein, L.G.** "Making Decision and the Temporal Resolution of Uncertainty", *International Economic Review*, June 1990, 2 (21), 269-283.

**Fankhauser, S. ET Tol, R.S.J.** "On Climate Change and Economic Growth", 5 June 2002, European Bank for Reconstruction and Development, and Hamburg, Vrije and Carnegie Mellon Universities. <http://www.uni-hamburg.de/Wiss/FB/15/Sustainability/growth.pdf>

**Godard, A.** "Le Réchauffement est-il naturel ? ", *Problèmes Economiques*, 25 Avril 2001, 18-21.

**Hourcade, J.C. ; Mégie, G. Et Theys, J.** "Le bouleversement des climats : comment gérer l'incertitude ? ", *Revue Futuribles*, Mai 1989, 3-21.

**Heal, G.** "Discounting and Climate Change", 1997, Columbia Business School. <http://www.columbia.edu/cu/business/wp/97/PW-97-03.htm>

----- "Valuing our Future: Cost-Benefit Analysis And Sustainability", August 1997, Columbia Business School, PW-97-08. <http://www.columbia.edu/cu/business/wp/>

----- "Valuing the Future: Economic Theory and Sustainability", Manuscript: an early version was delivered as the Lief Johansen Memorial Lectures at the University of Oslo in March 1995, and circulated as a University of Oslo Economics. <http://www.columbia.edu/cu/business/wp/98/pw-98-10.htm>

**Heal, G. ET Bengt, K.** "Uncertainties and Climate Change", *Environmental and Resource Economics*, 2002, 22, 3-39.

**Henry, C.** "Investment Decisions under Uncertainty: the Irreversibility Effect", *The American Economic Review*, December 1974, 64 (6), 1006-1012.

**Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).** <http://www.ipcc.ch/pub/wg1TARtechsum.pdf>

**Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).** "Climate Change 2001 : The Scientific Assessment", Summary for Policymakers, A Report Of Working Group I. <http://www.ipcc.ch/pub/technrep.htm>

**Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).** "Climate Change 2001 : Impacts, Adaptation, And Vulnerability", A Report Of Working Group II. <http://www.ipcc.ch>

**Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).** "Climate Change 2001 : Mitigation", A Report Of Working Group III. <http://www.ipcc.ch>

- Kopp, R.J ; Krupnick, A.J and Michael Toman, M.** “Cost-Benefit Analysis and Regulatory Reform: An Assessment of the Science and the Art”, 1997.  
[www.rff.org/Documents/RFF-DP-97-19.pdf](http://www.rff.org/Documents/RFF-DP-97-19.pdf)
- Lin, Y. ET Heal, G.** “The Value of Avoiding Climate Change”, *Economics Letters*, 8, 1981, 201-207. December 1997, Columbia Business School.  
<http://www.columbia.edu/cu/business/wp/97/PW-97-10.htm>
- Le Cocq, F.** “Distribution spatiale et temporelle des coûts de politiques publiques sous incertitudes: théorie et pratique dans le cas de l’effet de serre », *Thèse de doctorat en Sciences De L’Environnement*, Ecole Nationale Du Génie Rural, Des Eaux Et Forêts Centre De Paris, 2000.  
<http://www.centre-cired.fr/intranet/memthese.htm>
- Lepetit, P.** “Les Etats Unies et Le Changement Climatique DE Rio à Johannesburg”, *Revue d’Economie Financière*, 2002, 66, 57-100.
- Maddison, D. et A. Bigano** “The Amenity Value Of The Italian Climate”, Centre For Social And Economic Research On The Global Environment, University College London And University Of East Anglia.  
<http://www.cserge.ucl.ac.uk/publications.html>
- Mendelsohn, R. ; Nordhaus W.D. ET Shaw D.** “The impact of Global Warming on Agriculture : A Ricardian Analysis”, *The American Economic Review*, September 1994, 4 (84), 755-771.
- Minh Ha-Duong.** “Comment tenir compte de l’irréversibilité dans l’évaluation intégrée du changement climatique”, *Thèse de doctorat en Analyse et Politique Economiques*, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, 3 Avril 1998.  
<http://www.centre-cired.fr/intranet/memthese.htm>
- Ministry Of Environment And Land Planning.** “Initial communication of Tunisia under the United nations framework convention on climate change”, October 2001.  
<http://unfccc.int/text/resource/docs/natc/tunncl1e.pdf>
- Munasinghe, M. ET Lutz, E.** “Environmental Economics and Valuation in Development Decision making”, *Environmental Economics and Natural Management in Developing Countries*, edited by Mohan Munasinghe, Comity of International Development Institutions on the Environment (CIDIE), 1995.
- Newell, R. ET Pizer, W.** “Discounting the Distant Future: How Much Do Uncertain Rates Increase Valuations?” Original version: 19July 2000, Revised: 24October 2000, 14May 2001, <http://www.rff.org/Documents/RFF-DP-00-45.pdf>
- Nordhaus, W.D.** “Reflections on the Economics of Climate Change”, *Journal of Economic Perspectives*, 1993, 4 (7), 11-25.
- Priddle, R.** “The Energy Dimension of Climate Change”, *Revue de l’Energie*, Octobre 1997, 491, 583-588.
- Rouillon, S.** “Catastrophe Climatique Irréversible, Incertitude et Progrès de la Connaissance”, *Revue Economique*, Janvier 2001, 1 (52), 61-90.
- Schmalensee, R.** “Symposium on Global Climate Change”, *Economic Perspectives*, 1993, 4 (7), 3-11.
- Stavins, R.N.; Wagner A.F. ET Wagner G.** “Interpreting Sustainability in Economic Terms: Dynamic Efficiency plus Intergenerational Equity”, 14May 2002, Harvard University, Cambridge, Massachusetts.  
[http://www.ksg.harvard.edu/cbg/eephu/sustainability\\_theory .pdf](http://www.ksg.harvard.edu/cbg/eephu/sustainability_theory.pdf)
- Thaler, R.** “Some Empirical Evidence on Dynamic Inconsistency”, *Economics Letters*, 20 August 1981, 8, 201-207.
- Thaler, R.** “Some Empirical Evidence on Dynamic Inconsistency, Quasi rational economics”, New York: Russell Sage Foundation 1991, pp. 127-33.  
<http://www.lib.uchicago.edu/e/busecon/busfac/Thaler.html>
- Toman, M.** “Climate Change Risks and Policies: An Overview”. March 1997, Revised June 2000 • Climate Issues Brief No. 1 <http://www.rff.org/Documents/RFF-CCIB-01-REV.pdf>
- Toman, M.** “Research Frontiers in the Economics of Climate Change”, April 1998, Discussion Paper 98-32.  
<http://www.rff.org/Documents/RFF-DP-98-32.pdf>
- Treich, N.** “Environnement : vers une théorie économique de la précaution”, *Problèmes Economiques*, 10 Juin 1998, 2.572, 19-25.
- Weyant, J.P.** “Costs of Reducing Global Carbon Emissions”, *Economic Perspectives*, 1993, 4 (7), 27- 46.

## Notes

[1]. Le *GIEC* est une organisation mondiale mise en place, en 1988, conjointement par le programme des Nations Unies pour l'environnement et l'Organisation Météorologique Mondiale pour coordonner l'effort international de recherche sur le changement climatique. Le GIEC est divisé en trois groupes consacrés pour le premier à l'étude du climat, pour le second à l'adaptation des écosystèmes et des économies au changement climatique, et pour le troisième à l'évaluation économique des politiques de prévention de ce changement. Cette organisation, qui rassemble l'ensemble des experts internationaux travaillant, sur ces questions, produit régulièrement des rapports qui font la synthèse de la connaissance disponible sur l'effet de serre. Le premier a été publié en 1990, le second en 1996 et le troisième, le dernier est celui de 2001.

[2]. Le *coût d'opportunité* d'un bien est la quantité de l'autre qu'il faut sacrifier pour obtenir une unité supplémentaire du premier bien. On peut mesurer le coût d'opportunité d'un bien en diminuant sa quantité. Alors, son coût est la quantité de l'autre qu'on obtient.